

УДК 551.435.627:550.834(282.26.341)

М.А. Соловьева¹, А.В. Старовойтов², Г.Г. Ахманов³, О.М. Хлыстов⁴,
А.В. Хабуев⁵, М.Ю. Токарев⁶, Д.А. Ченский⁷

ИСТОРИЯ ОПОЛЗНЕВОЙ ДЕСТРУКЦИИ СКЛОНА КУКУЙСКОЙ ГРИВЫ (ОЗ. БАЙКАЛ) ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ⁸

По результатам сейсмоакустических исследований последних лет в строении верхней части разреза северо-западного склона Кукуйской Гривы выделены два сейсмокомплекса и слагающие их сейсмofации, характеризующие степень оползневой деструкции склона. Выявлено, что время и характер проявления оползневых процессов весьма разнообразны. Впервые построены сейсмofациальные схемы района. Граница между сейсмокомплексами предположительно датирована в 150 тыс. лет. Установлено, что оползание склона более активно проходило в познеплейстоцен-голоценовое время, что отражает активизацию вертикальных тектонических движений на этом участке Байкальской рифтовой системы.

Ключевые слова: оз. Байкал, дельта Селенги, Кукуйская Грива, непрерывное сейсмопрофилирование, гравитационные процессы, оползневые тела, поздний плейстоцен—голоцен.

As a result of careful interpretation of the data of recent seismo-acoustic surveys, two major seismic complexes were identified in the structure of upper sedimentary section of the north-western slope of Kukuy Griva (ridge). They are composed of several very characteristic inner seismo-facies and separated by well-expressed regional reflector. Seismic and acoustic data revealed evidences of numerous landslide processes which were different in age and peculiarities of manifestation. For the first time, detailed schemes of seismo-facies distribution are compiled for both major seismic complexes. The boundary between seismic complexes is dated as 150 thousands years. It is shown that sliding was more intensive during Late Pleistocene and Holocene, reflecting activation of tectonic movements in this part of Baikal rift system.

Key words: Lake Baikal, Selenga delta, Kukuy Griva, seismic profiling, mass-transport processes, landslides, Late Pleistocene — Holocene.

Введение. Байкал — самое древнее (более 25 млн лет) и самое глубокое озеро в мире (1637 м) [Атлас..., 1993]. В последнее десятилетие возобновилось активное изучение геологического строения Байкальской котловины и уточнение рельефа дна с использованием новых современных методов. В 2009 г. в ходе съемки дна многолучевым эхолотом сотрудниками ЛИИ СО РАН в совместной экспедиции с бельгийскими учеными из универси-

тета г. Гент (Бельгия) получены батиметрические данные высокого разрешения. Эти новые данные, подкрепленные анализом материалов сейсмоакустических исследований, позволили обнаружить в средней котловине озера, на северо-западном склоне подводной возвышенности, носящей название Кукуйской Гривы, признаки современных масштабных субаквальных оползаний [Casier, 2010].

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, студентка; *e-mail:* marina-sol@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, доцент; *e-mail:* starovoitov_msu@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, доцент; *e-mail:* akhmanov@geol.msu.ru

⁴ Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, лаборатория геологии оз. Байкал, и.о. заведующего лабораторией; *e-mail:* oleg@lin.irk.ru

⁵ Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, лаборатория геологии оз. Байкал, вед. инженер; *e-mail:* shock@lin.irk.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, ст. препод.; *e-mail:* tokarev@eage.ru

⁷ Иркутский национальный исследовательский технический университет, отдел информационно-измерительных систем, инженер; *e-mail:* dimpson05@yandex.ru

⁸ Экспедиционные работы проекта Class@Baikal финансировались за счет средств ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова», ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», корпорации «КонокоФиллипс Россия Инк.», ОАО «НК «Роснефть», гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-35-10038). Анализ данных частично выполнен в рамках проекта № 0345-2014-0009. Батиметрические данные 2009 г. получены в рамках Программы Президиума РАН 17.8 (2009) и проекта FWO Flanders (1.5.198.09).

Кукуйская Грива представляет собой вытянутое в северо-восточном направлении поднятие в пределах комплекса авандельты р. Селенга. Грива ограничивается с юго-востока хорошо выраженным глубоким каньоном и характеризуется относительно пологим северо-западным склоном. Возвышенность расположена на плоском участке авандельты р. Селенга, средняя глубина варьирует от 300 до 350 м. Минимальная глубина над Гривой составляет ~190 м.

В 2014 и 2015 гг. детальные геолого-геофизические исследования на северо-западном склоне Кукуйской Гривы проведены в рамках двух совместных экспедиций МГУ имени М.В. Ломоносова, ЛИН СО РАН и ИрНИТУ по проекту Class@Baikal. В соответствии с программой экспедиционных работ на склоне Кукуйской Гривы выполнены сейсмоакустические работы и донное опробование с целью изучения особенностей строения района и проявлений склоновых процессов. Анализ сейсмоакустических данных, полученных в этих и более ранних экспедициях, позволил детально охарактеризовать оползневые образования на склоне Кукуйской Гривы, выполнить их типизацию и оценить территориальное распределение выделенных типов.

Методика работ и аппаратура. Работы проводились с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Г.Ю. Верещагин», принадлежащего ЛИН СО РАН.

Верхняя и средняя части северо-западного склона Кукуйской Гривы детально изучены во время первой экспедиции Class@Baikal летом 2014 г. Сейсмоакустические работы выполнялись по методике непрерывного сейсмического профилирования. Источник сейсмических колебаний — одноэлектродный электроискровой источник («спаркер») в эластичном контейнере с подсоленной водой. Центральная частота возбуждаемого сигнала составляла 750 Гц при энергии 600 Дж, что обеспечило получение данных с разрешением по вертикали до 0,5 м. Интервал излучения составлял 1,5 с, что при скорости хода судна в 4 узла обеспечило шаг между пунктами выстрела, равный 3 м. Регистрация сигнала производилась одноканальной косой (20 м) из 10 пьезоприемников [Соловьева и др., 2014].

В сентябре 2014 г. дополнительно выполнена съемка склона с использованием профилографа и гидролокатора бокового обзора. Центральная частота профилографа составляла 6 кГц, что позволило изучить верхнюю часть разреза до глубины 50 м с вертикальным разрешением 15 см. Гидролокатор бокового обзора работал на частоте 30 кГц.

В 2015 г. во время Второй экспедиции Class@Baikal выполнены детальные исследования подножия Кукуйской Гривы с использованием набортного профилографа «Knudsen Chirp 3260»,

который возбуждал сигнал с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ): полоса частот — от 1 до 10 кГц. Применение ЛЧМ-сигнала позволило достичь глубины проникновения до 50 м и разрешения до 0,1 м.

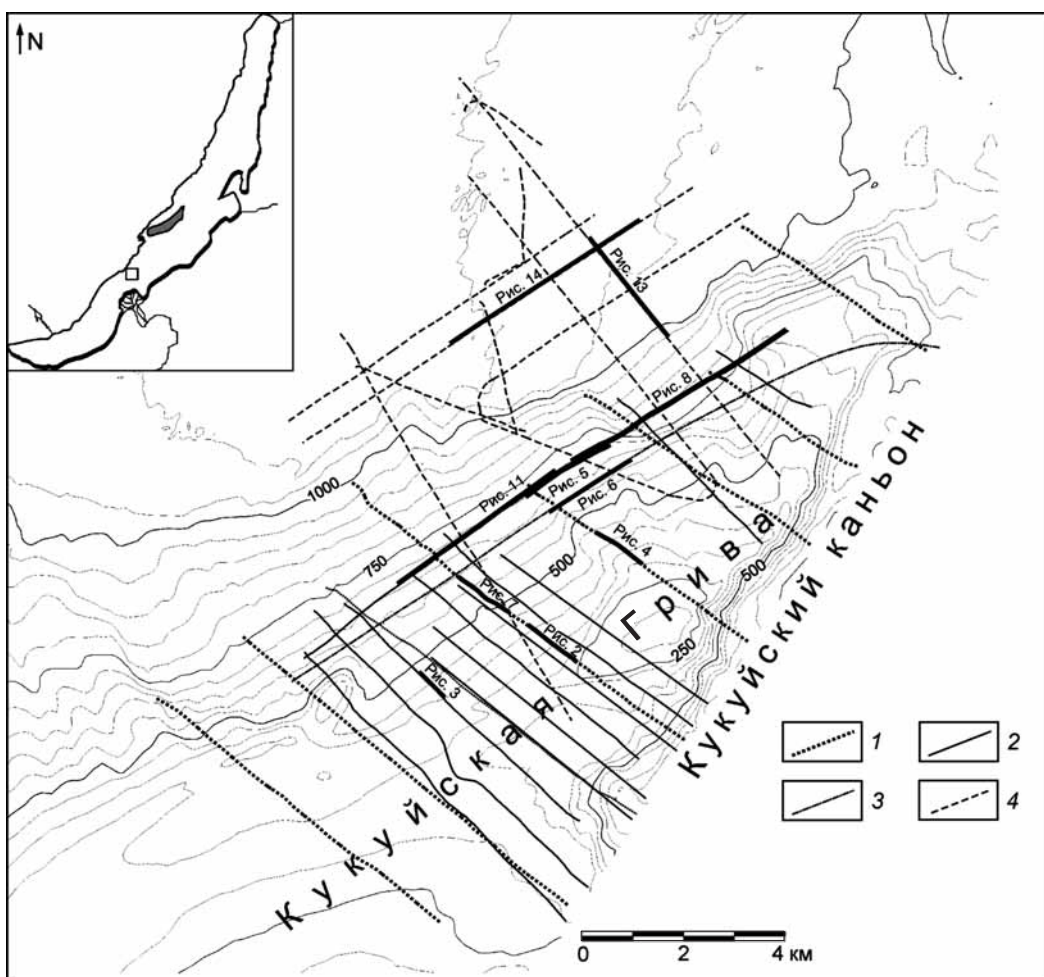
В дополнение к материалам указанных экспедиций в работе использованы материалы сейсмоакустических исследований 2005 г., выполненных в рамках российско-индийского проекта на Кукуйской Гриве методом непрерывного сейсмического профилирования с использованием «спаркера» в качестве источника упругих колебаний. В экспедиции 2005 г. полоса частот возбуждаемого сигнала варьировала от 250 до 500 Гц. Приемная коса длиной 15 м состояла из 15 гидрофонов, объединенных параллельно в один канал. Получены временные разрезы осадочных отложений мощностью до 300 м с разрешающей способностью до 1 м [Khlystov et al., 2007; Ramesh et al., 2013].

Обработка полученных и имеющихся в нашем распоряжении сейсмических данных выполнена в программном комплексе RadExPro, разработанном компанией ООО «Деко-геофизика СК». Всего обработано 33 профиля с общей длиной сейсмической записи 353 км (рис. 1).

Сейсмоакустические исследования позволили изучить самую верхнюю часть разреза осадочных отложений вершины и склонов Кукуйской Гривы, в то время как мощность отложений дельты р. Селенга составляет более 9 км [Scholz, Hutchinson, 2000]. Глубинность исследований в среднем составила 200 м (около 170 м), достигая на некоторых профилях 300 м (около 250 м). При пересчете в глубинный масштаб здесь и далее использовалась скорость акустических волн 1,7 км/с (средняя скорость продольных волн в отложениях верхней части разреза по результатам исследования керна бурения на Академическом хребте оз. Байкал [Позднекайнозойская..., 2000]).

Рельеф дна района исследований. Кукуйская Грива — удлиненная в плане возвышенность на периферии подводной части дельты Селенги. Возвышенность хорошо выражена в рельефе дна и простирается в северо-восточном направлении. По-видимому, Кукуйскую Гриву можно рассматривать в качестве подобия эрозионного останца. С юго-востока грива отделена от другой части авандельты глубоким каньоном, а ее северо-западный, более пологий склон во многих местах представляет собой стенки отрыва оползневых блоков различного размера. Глубина воды над высшей точкой гривы составляет около 190 м (согласно батиметрическим данным Проекта INTAS 99-1669 Team, 2002 [De Batist et al., 2002]) (рис. 1). В интервале глубины 300–350 м на юго-западной периферии грива переходит в плато с пологим дном. На отдельных участках северо-западного склона гривы между изобатами 350 и 400 м можно отметить резкий перегиб в рельефе дна, вплоть

Рис. 1. Схема расположения сейсмоакустических профилей разных лет на полигоне Кукуйская Грива и фрагментов профилей, представленных на рис. 2–8, 11, 13, 14: 1 — сейсмические профили (2005 г., источник «спаркер»); 2 — сейсмические профили экспедиции Class@Baikal (2014 г., источник «спаркер»); 3 — профиль профилографа и гидролокатора бокового обзора (осень 2014 г.); 4 — профили профилографа экспедиции Class@Baikal (2015 г.). Сечение изобат 50 м. Положение изученного участка указано на врезке



до довольно крутого обрыва высотой 30–80 м. Ниже обрыва склон выполаживается до 6–8°. В интервале глубины 1050–1100 м наблюдается переход от склона авандельты к выровненному, субгоризонтальному дну центральной части котловины озера.

Размеры изученного участка Кукуйской Гривы в плане достигают 6,7 км по падению склона и более 18 км по его простиранию.

Анализ данных сейсмоакустических исследований на склоне Кукуйской Гривы состоял в выделении на профилях типичных сейсмофаций, слагающих осадочные комплексы, и оценке характера распространения выделенных сейсмофаций в вертикальных разрезах и по латерали. Впоследствии это позволило сделать ряд заключений об особенностях позднечетвертичного осадконакопления в изученном районе.

На сейсмопрофилях отчетливо выделяются два комплекса отложений, различающихся по характеру волновой картины и разделенных отчетливым высокоамплитудным рефлектором.

Осадочный **комплекс «Б»** (нижний) охарактеризован двумя сейсмофациями с разной степенью деформированности отложений. Кровля комплекса прослеживается на всех профилях в виде отчетливой прямолинейной оси синфазности

с относительно повышенной амплитудой, параллельной более глубоким отражающим границам и генеральному падению склона гривы. Подошва комплекса не прослеживается вследствие недостаточной глубины сейсмической записи. Комплекс распространен повсеместно и характеризуется наблюдаемой мощностью от 45 до 200 м и более. Комплекс слагают типичные гемипелагические отложения зоны подножия и дистальной части авандельты.

Сейсмофация Б-1 широко распространена и представлена слоистыми, практически недеформированными отложениями (рис. 2–8, 14). Кровля пачек сейсмофации Б-1 совпадает с кровлей комплекса и представлена прямолинейной границей.

Также в пределах нижнего осадочного комплекса «Б» можно охарактеризовать **сейсмофацию Б-2**. Это участки с волнообразной волновой картиной, с потерей корреляции осей синфазности вплоть до хаотичной сейсмической записи. Подошва пачек сейсмофации Б-2 регистрируется лишь на отдельных профилях, где она наблюдается в виде отчетливой прямолинейной оси синфазности. Кровля пачек сейсмофации Б-2 неровная, бугристая, облекается отложениями перекрывающей сейсмофации Б-1 (рис. 11). Сейсмофация Б-2

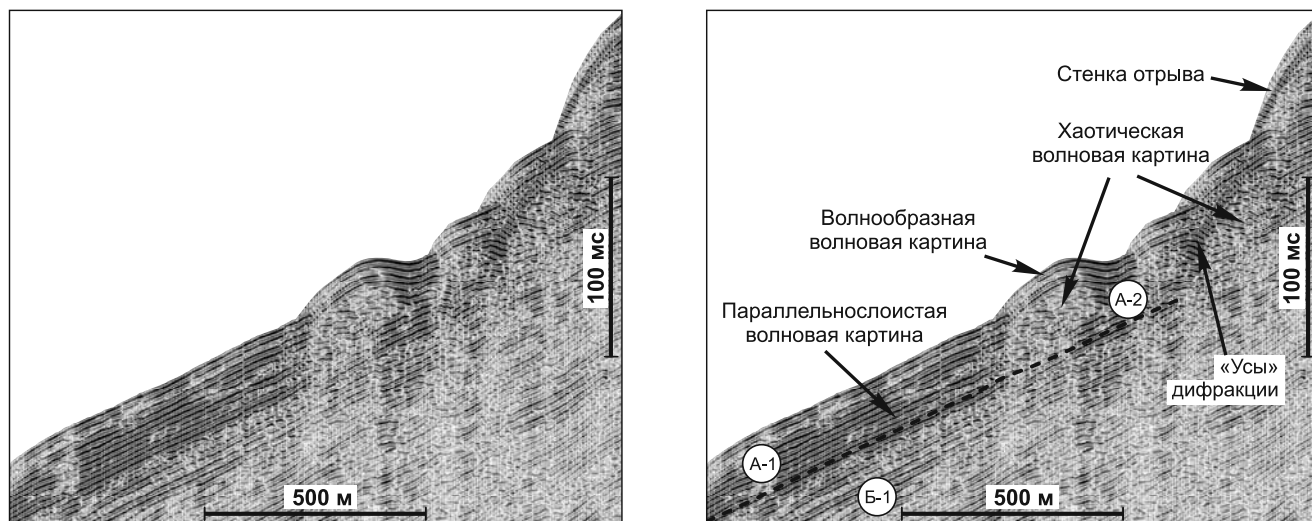


Рис. 2. Типы волновой картины комплекса «А». Фрагмент профиля BL05-04 (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

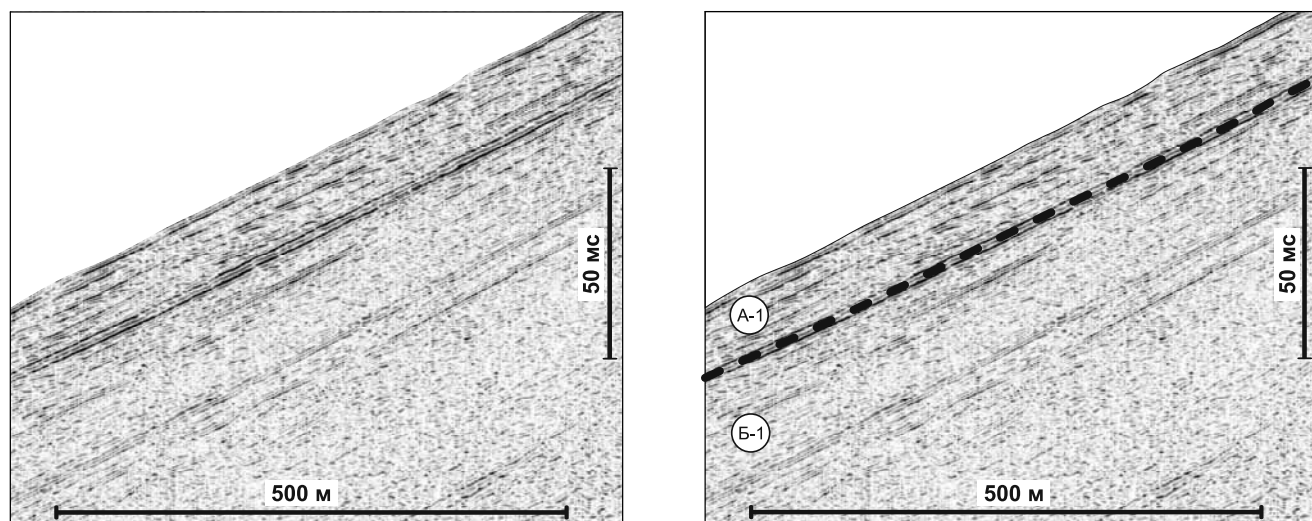


Рис. 3. Типы волновой картины сейсмofаций А-1 и Б-1. Фрагмент профиля BL14-16PS (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

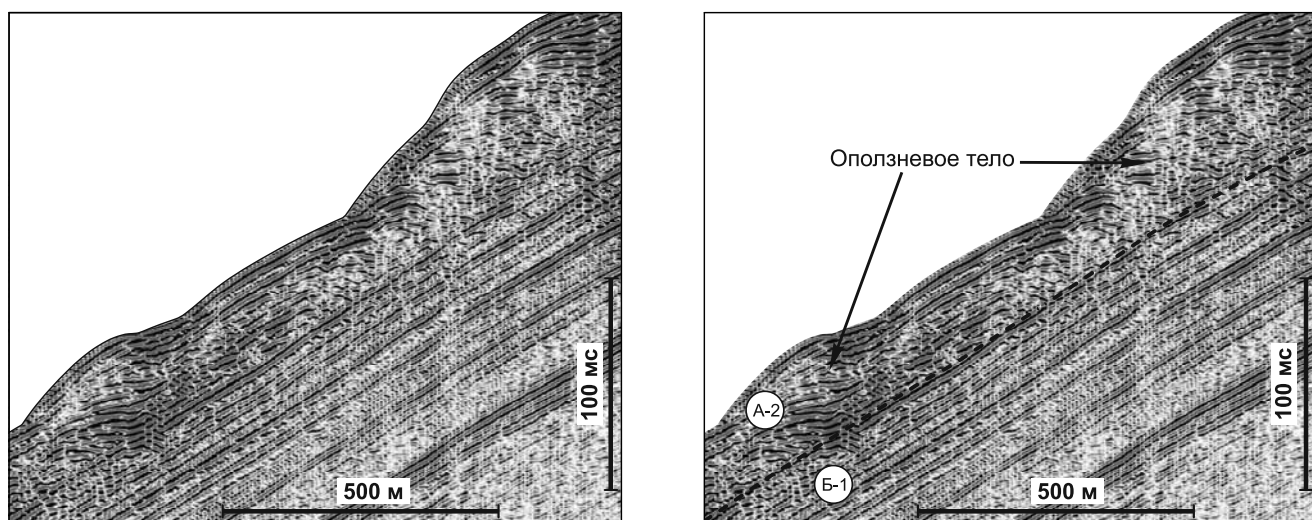


Рис. 4. Типы волновой картины сейсмofаций А-2 и Б-1. Фрагмент профиля BL05-05 (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

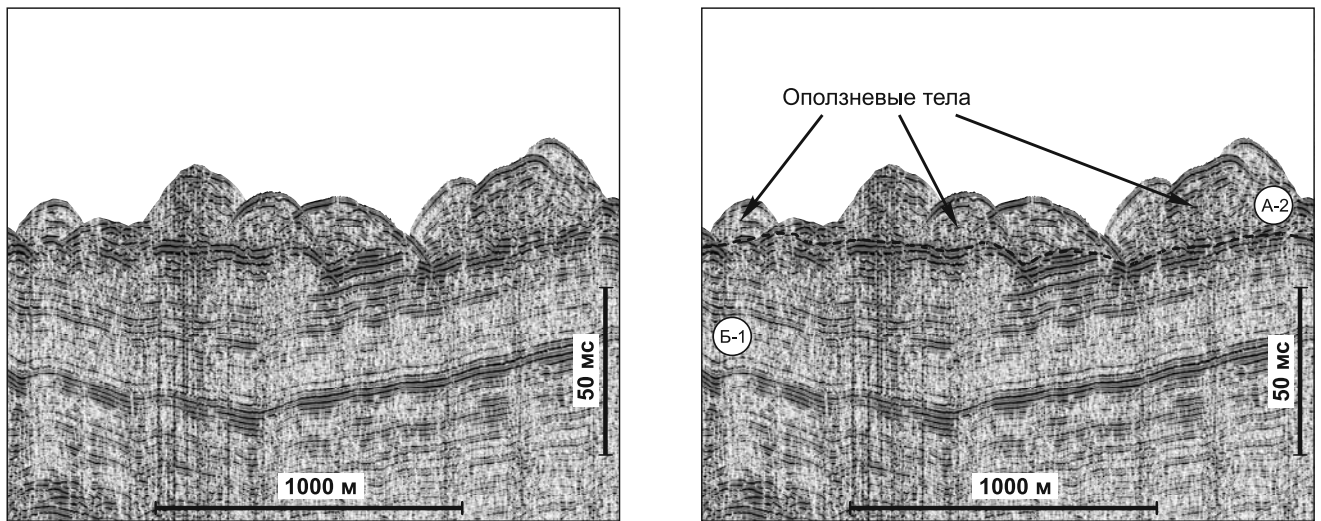


Рис. 5. Типы волновой картины оползневых тел, регистрируемых на сейсмических профилях съемки со «спаркером». Фрагмент профиля BL14-19PS (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

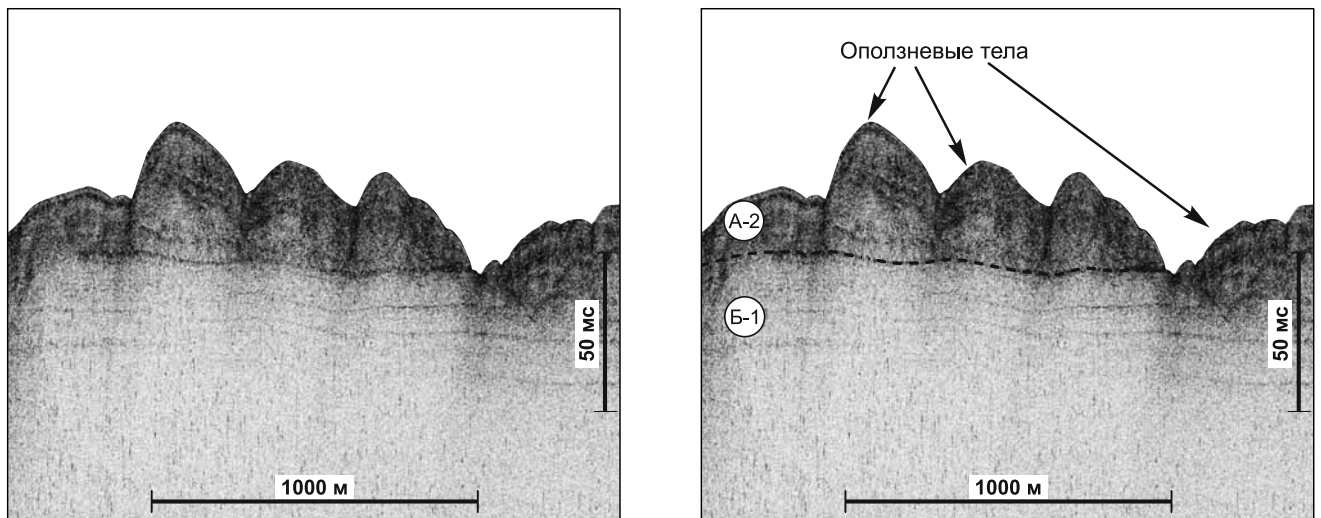


Рис. 6. Пример волновой картины оползневых тел, регистрируемых на профилях профилографа. Фрагмент профиля BL14-01SO (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

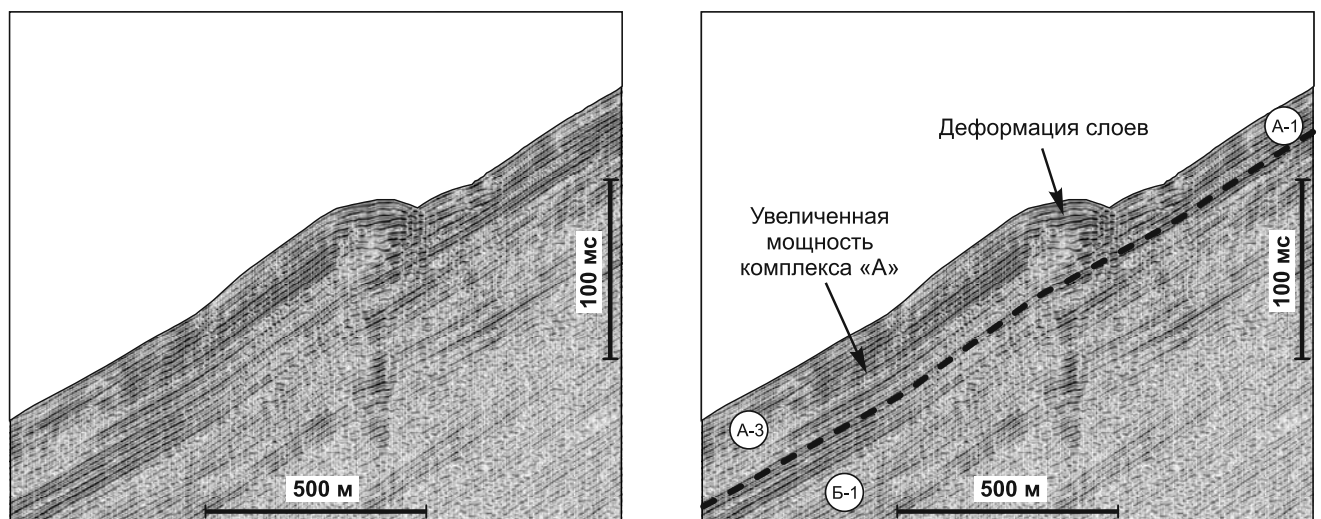


Рис. 7. Пример волновой картины сейсмofаций А-3, А-1 и Б-1. Фрагмент профиля BL05-04 (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

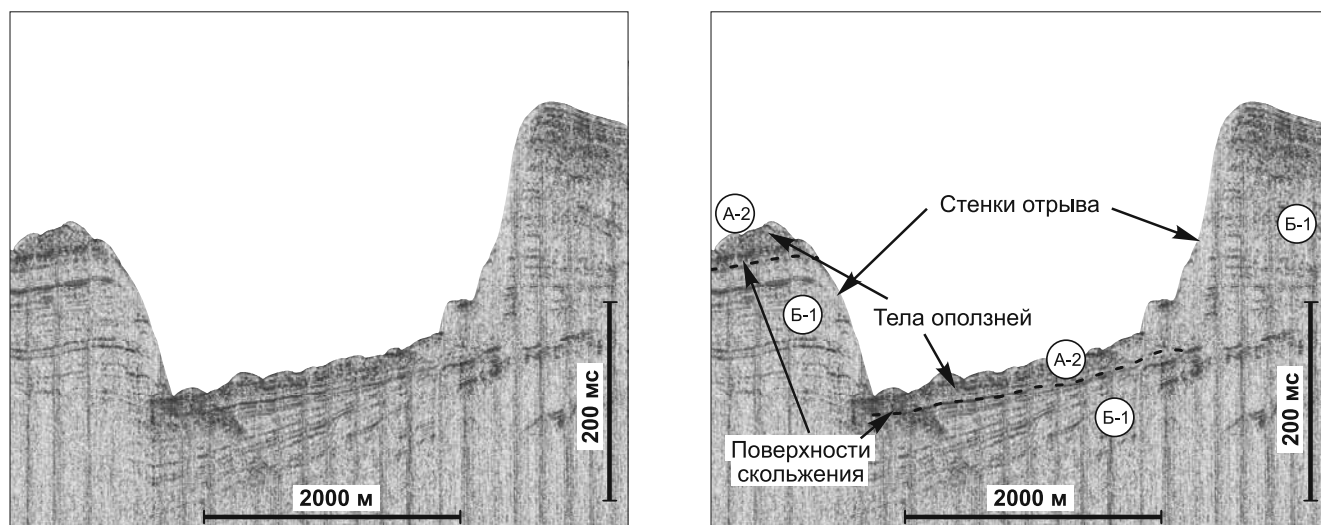


Рис. 8. Оползневой цирк. Фрагмент профиля BL14-19PS (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

распространена локально и отделена от комплекса «А» пачками сейсмofации Б-1 мощностью от 45 до 130 м. Пачки, охарактеризованные сейсмofацией Б-2, представлены крупными линзовидными телами, латерально выклинивающимися со сменной хаотичной волновой картины на параллельнослоистую, без признаков деформации. Такие линзовидные тела отнесены к палеооползневым накоплениям. В изученном районе по результатам сейсмоакустических работ выделено 4 относительно небольших палеооползня (до 1 км в поперечнике) и один крупный (4,3 км). Кровли палеооползней фиксируются на глубине от 45 до 130 м от поверхности дна, а их мощность достигает 50 м. Стенки отрыва древних оползней не обнаружены. Приблизительные контуры погребенных оползневых тел показаны на рис. 12.

В пределах всего изучаемого района на отложениях комплекса «Б» залегают накопления, которые мы относим к осадочному комплексу «А» (рис. 9).

Наилучшим образом на сеймопрофилях охарактеризовано строение самого верхнего комплекса (комплекс «А»). Его кровлей всегда служит поверхность дна. Дно изученного участка преимущественно наклонное, ровное или бугристое. Подошва комплекса на сеймопрофилях выделяется по высокоамплитудной прямолинейной оси синфазности, отчетливо выделяющейся на всех профилях. Волновая картина в пределах комплекса довольно изменчива, может меняться на коротком расстоянии от хаотичной до волнообразной и параллельнослоистой (рис. 2). Это позволяет выделить в строении комплекса несколько сейсмofаций.

Сейсмofация А-1. Наиболее распространены накопления, характеризующиеся параллельнослоистой волновой картиной, без значительных признаков деформации (рис. 3). Угол падения слоев составляет около 7° и соотносится с углом

наклона склона. Поверхность дна на участках распространения сейсмofации ровная, не осложненная перегибами и выступами. Отложения в основном выдержаны по мощности. Мощность отчетливо регистрируемых самых верхних ненарушенных параллельнослоистых накоплений составляет 18–20 м. Отложения, охарактеризованные этой сейсмofацией, несут признаки спокойной гемипелагической седиментации «частица за частицей», характерной для самых дистальных частей авандельты, где поступающий в значительном количестве тонкий терригенный материал смешивается с собственно озерным и медленно осаждается.

Сейсмofация А-2. В верхней части изученного склона Кукуйской Гривы отмечены накопления, характеризующиеся мощностью до 35–50 м, с признаками значительных деформаций. Рельеф дна здесь весьма неровный и бугристый. На сейсмических профилях деформации отражаются в появлении многочисленных дифракционных эффектов, изгибах и укорочении осей синфазности вплоть до формирования хаотической волновой картины (рис. 2, 4–6, 8, 11). Под такими накоплениями иногда четко определяется ровная прямолинейная граница-рефлектор, отделяющая сейсмofацию А-2 от нижележащего комплекса «Б». Ниже по падению склона гривы сейсмofация А-2 обычно сменяется сейсмofацией А-1. Область распространения деформированных слоев сейсмofации А-2 расположена в виде полосы (ширина от 0,5 до 2,5 км) под крутым обрывом высотой около 100 м на северном окончании Кукуйской Гривы и под более пологим уступом высотой до 30 м, в центральной части изученного района (рис. 9, 10).

Сейсмofация А-2 характеризует современные оползневые накопления, а ровный высокоамплитудный рефлектор, отмечаемый в подошве некоторых оползневых тел, вероятно, представляет собой поверхность срыва и скольжения оползня

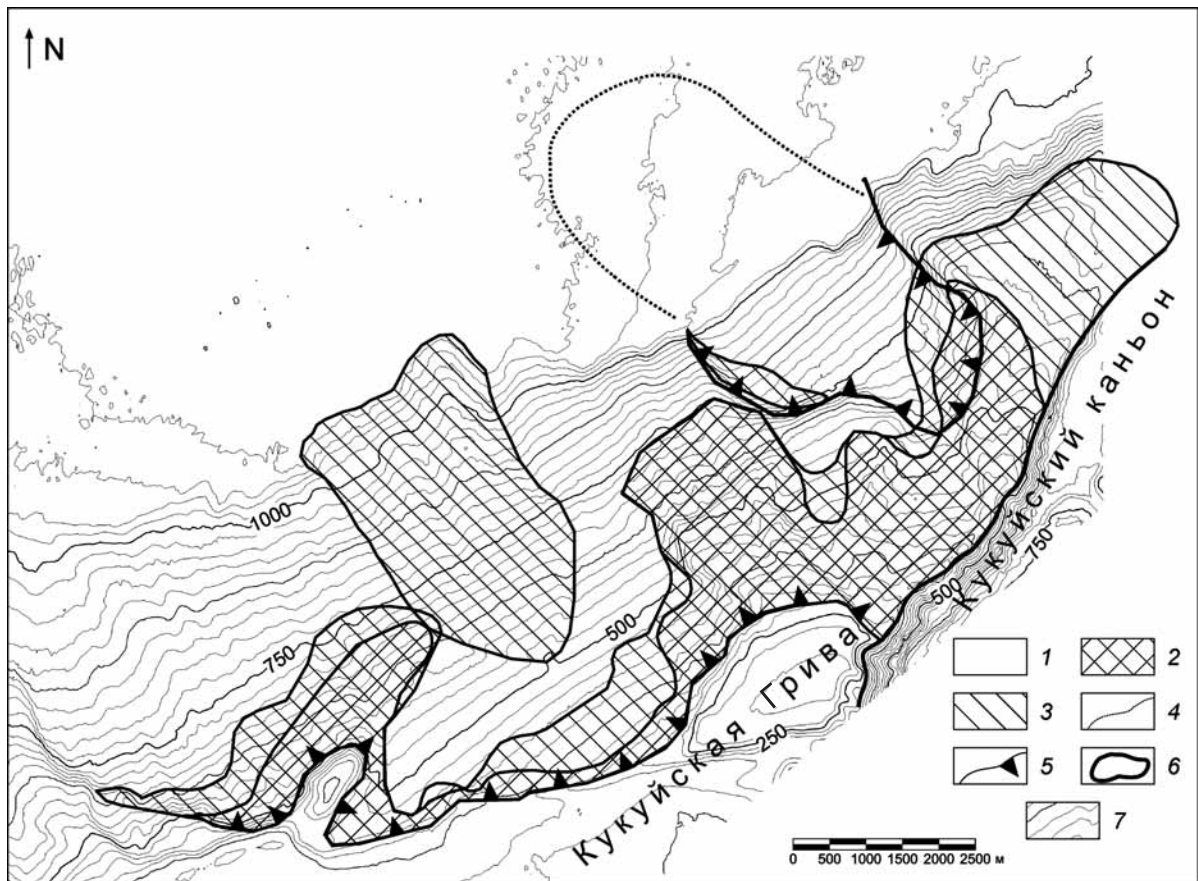


Рис. 9. Сейсмофациальная схема комплекса «А»: 1 — сейсмофация А-1; 2 — сейсмофация А-2; 3 — сейсмофация А-3; 4 — предположительные границы оползневой массы у подножия склона; 5 — стенка отрыва оползневых тел; 6 — границы сейсмофаций; 7 — изолинии рельефа дна (сечение изобат 25 м)

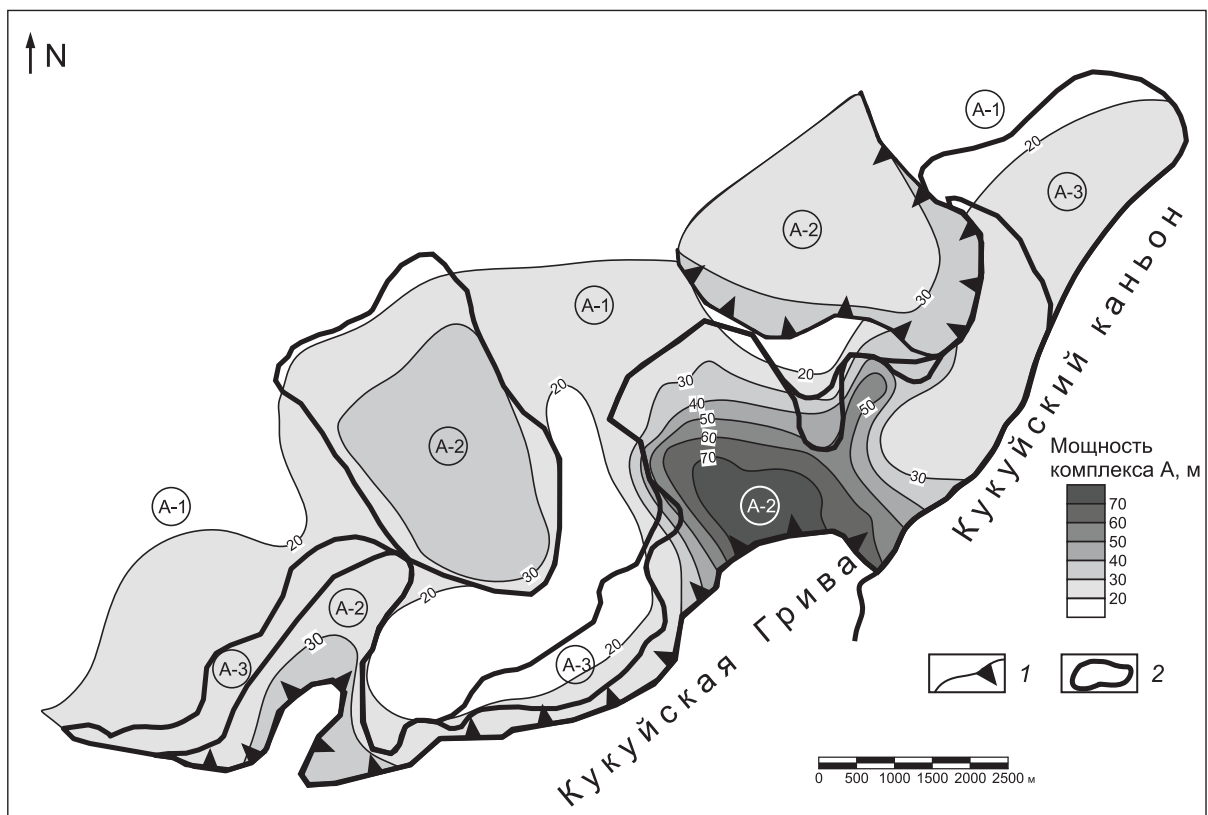


Рис. 10. Схема мощности комплекса «А»: 1 — стенка отрыва оползневых тел; 2 — границы сейсмофаций. В кружках — номера сейсмофаций

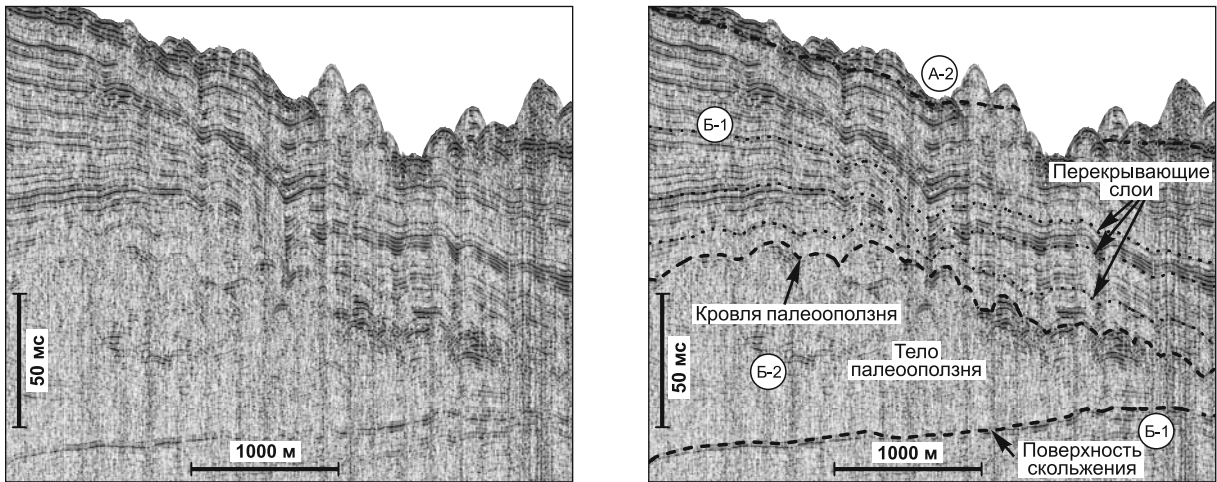


Рис. 11. Пример волновой картины сейсмофаций Б-2 (палеооползень), Б-1 и А-2. Фрагмент профиля ВЛ14-19PS (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

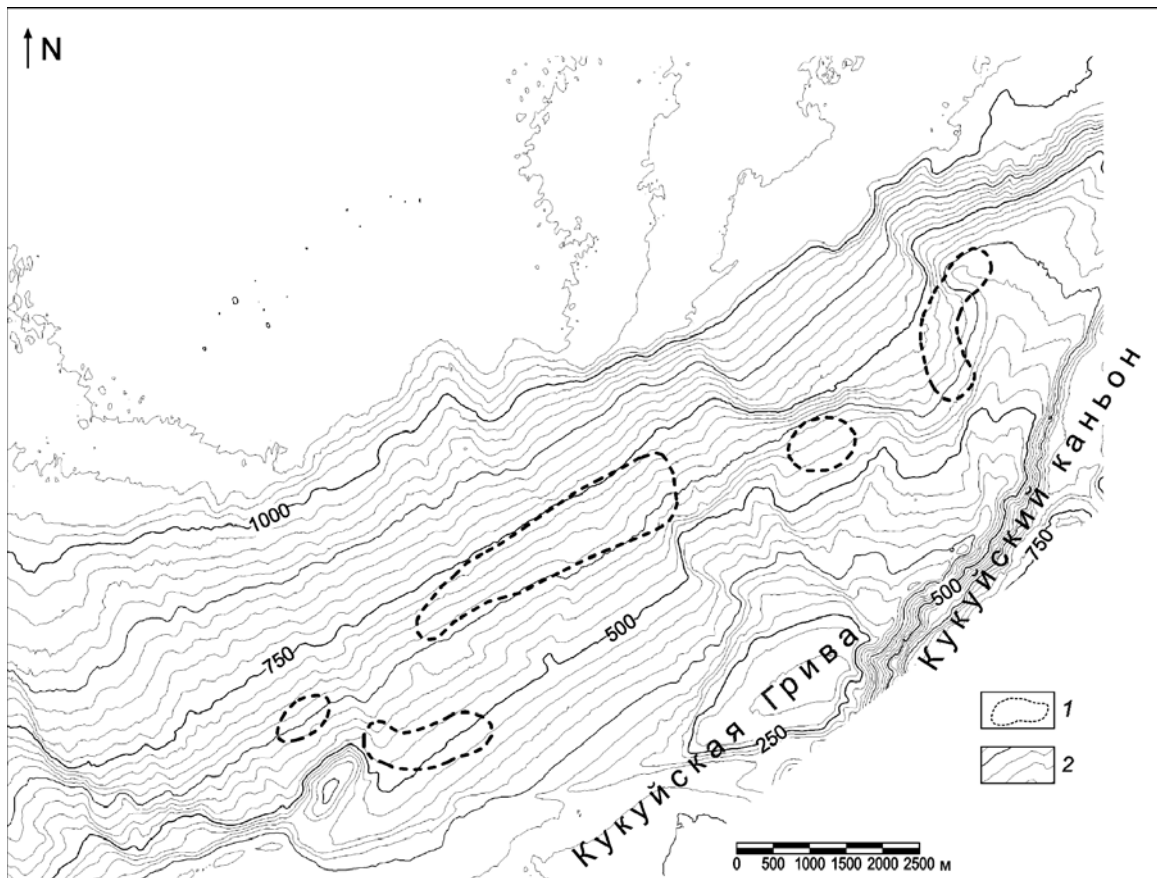


Рис. 12. Схема распространения палеооползней (сейсмофация Б-2): 1 — предполагаемые границы погребенных оползней; 2 — изолинии рельефа дна (сечение изобат 25 м)

(рис. 2–8). Очевидно, оползанию подвержены недавно накопившиеся и еще слабоуплотненные гемипелагические илы. Отмечается, что оползневые тела сейсмофации А-2 характеризуются главным образом относительно небольшими размерами. Фронтальная зона смятия в пределах таких оползневых тел неотделима от зоны тыловой деструкции, текстуры оползневых деформаций затрагивают весь объем перемещаемого материала. Вся верхняя часть изученного склона Кукуйской Гривы представляет

собой район развития многочисленных отдельных оползней такого типа (рис. 9, 10), вероятно, связанных с различными эпизодами тектонической активизации в районе. Оползневое перемещение осуществлялось в целом на небольшое расстояние. Описанные оползневые тела и поверхности скольжения наиболее отчетливо выделяются на профилях вдоль простирания склона.

Сейсмофация А-3. На некоторых участках на склоне Кукуйской Гривы распространены накопле-

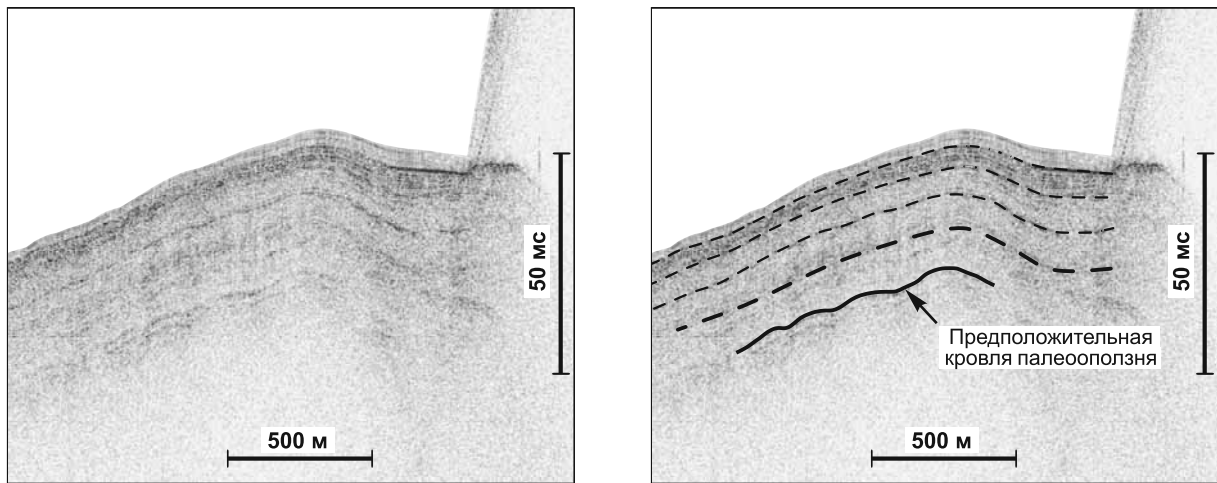


Рис. 13. Слоистые отложения у подножия склона Кукуйской Гривы в районе оползневого цирка и предположительная кровля палеооползня. Фрагмент профиля BL15-92PR (слева) и его интерпретация (справа). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

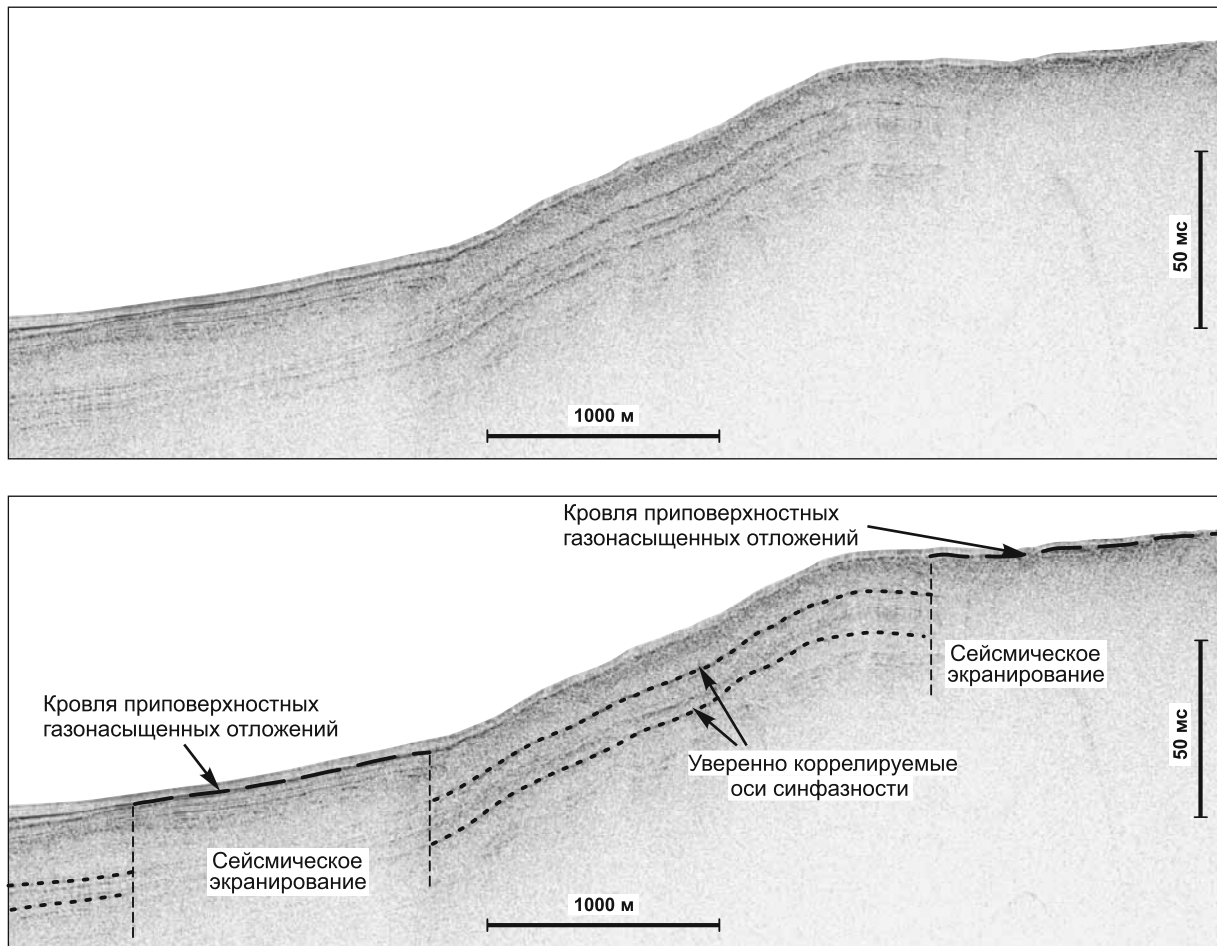


Рис. 14. Пример приповерхностных газонасыщенных отложений у подножия склона Кукуйской Гривы. Фрагмент профиля BL15-96PR (вверху) и его интерпретация (внизу). Положение фрагмента профиля см. на рис. 1

ния, выделенные нами в отдельную сейсмофазию и характеризующиеся увеличенной мощностью (до 25–40 м), но без ярко выраженных признаков внутренних деформаций (рис. 7). Поверхность дна на таких участках довольно ровная. Вниз по склону мощность таких накоплений плавно уменьшается, оси синфазности остаются параллельными. Вверх

по склону признаки деформаций в пределах описываемых пачек становятся более отчетливыми, оси синфазности резко изгибаются. По простиранию сейсмофазия А-3 может сменяться другими сейсмофазиями, выделяемыми в пределах комплекса «А». Области распространения накоплений, относимых к сейсмофазии А-3, протягиваются по

лосой (до 2 км шириной) в верхней части склона гривы, а также отмечаются на отдельных участках в центральной части и вдоль всего склона (рис. 9, 10). Описанные отложения, вероятно, также имеют гравитационную природу. Они представляют собой более крупные оползневые тела, часто перемещенные на более значительное расстояние за счет скольжения и без существенного нарушения внутреннего строения. Верхняя кромка таких тел часто формирует типичную тыловую террасу оползня. Материал фронтальных частей оползня мог быть оторван и перемещен в глубоководные области в виде плотностных потоков разной реологии, что в целом весьма типично для склоновой седиментации.

Признаки самого обширного современного оползания обнаружены в северной части Кукуйской Гривы. Здесь по данным сейсмоакустических исследований фиксируется масштабный оползневой цирк (рис. 9, 10). Размеры цирка в плане 3,2×3,3 км. Высота стенки отрыва достигает 170 м. Оползание затронуло отложения комплекса «А» на всю мощность, а также верхнюю часть комплекса «Б» (рис. 11, 12). На дне цирка, у подножия стенки отрыва отмечаются современные оползневые и обвальные накопления, характеризующиеся на сейсмопрофилях волнообразным и хаотичным типом волновой картины, по характеристикам схожие с накоплениями сейсмофации А-2 (рис. 8). Мощность таких накоплений до 50 м.

Склон Кукуйской Гривы и его подножие под оползневым цирком дополнительно изучали при помощи набортного профилографа (рис. 1). Полученные высокоразрешающие данные верхних 40 м донных отложений подтвердили наличие границы между сейсмокомплексами, которая выделена ранее на сейсмограммах, полученных при использовании источника типа «спаркер».

При исследовании подножия склона под крупным оползневым цирком предполагалось изучить свойства материала, перемещенного склоновыми процессами. Прежде всего мы рассчитывали обнаружить крупное тело, генетически связанное с формированием самого оползневого цирка. Это позволило бы предположить время катастрофического, самого масштабного оползания в районе исследований и определить его причины. Однако данные профилирования с профилографом показали, что подножие Кукуйской Гривы по всей мощности толщи, «просвеченной» профилографом, сложено практически недеформированными слоистыми осадочными образованиями (рис. 13). На данных профилографа признаков тела крупного оползня не обнаружено. Лишь на одном профиле в нижней части наблюдается волнообразная ось синфазности, которая предположительно может представлять собой погребенную кровлю оползня (рис. 13).

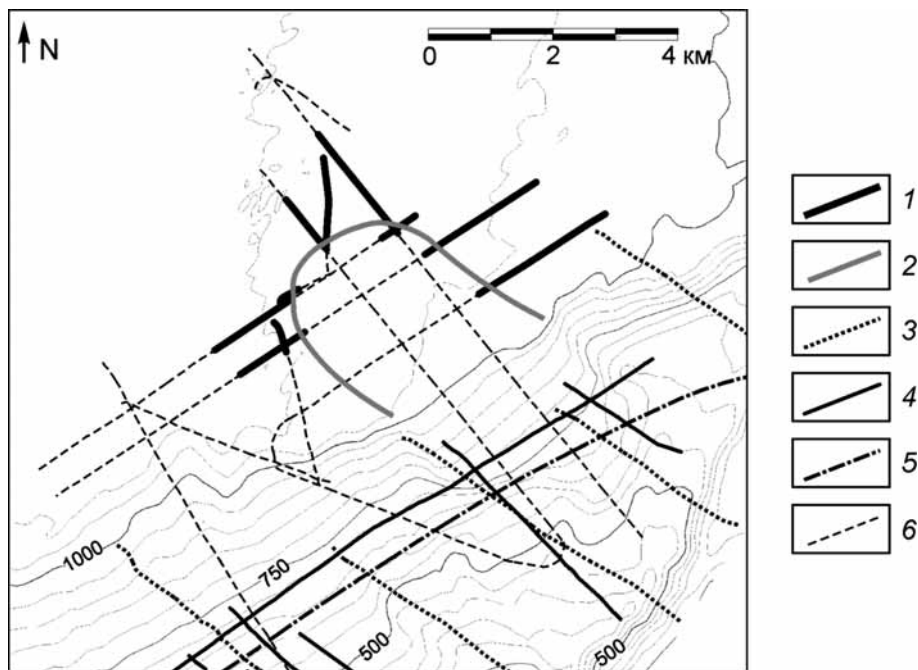
По всей видимости, оползание, ставшее причиной образования крупного цирка на склоне Кукуйской Гривы, произошло относительно давно. Тело оползня погребено под более молодыми отложениями, характеризующими спокойную гемипелагическую седиментацию последнего этапа геологического развития района. На наличие такого погребенного тела указывают косвенные признаки на записях профилографа. У подножия склона ниже цирка на сейсмограммах профилографа наблюдаются признаки газонасыщенности приповерхностных отложений. На этих участках на сейсмопрофилях происходит экранирование нижележащих отложений, амплитуда осей синфазности резко уменьшается, волновая картина по латерали переходит от параллельнослоистой к хаотической и акустически прозрачной. Кроме того, в некоторых случаях над «немыми» зонами наблюдается относительное повышение амплитуды придонных осей синфазности (рис. 14).

Зоны повышенного газонасыщения современных осадков в плане расположены широким полукругом, выпуклым в сторону котловины озера (рис. 15). Оконтуренный таким образом район распространения ненасыщенных газом илов в плане напоминает язык у подножия оползневого цирка, простирающийся в сторону глубоководья. На записях профилографа граница между илами с разной степенью газонасыщенности довольно резкая. Такая картина отражает резкую неоднородность в строении осадочного разреза ниже глубины акустической записи профилографа. Возможно, это указывает на наличие на небольшой глубине от поверхности ограниченного по площади и слабопроницаемого осадочного образования, экранирующего разгрузку газа. В таких случаях газовые потоки обычно устремляются к периферии непроницаемого тела, что приводит к формированию в этих областях зон с повышенной газонасыщенностью приповерхностных илов. Данные позволяют предположить, что роль погребенного слабопроницаемого образования у подножия склона может играть тело крупного оползня. На основе этой гипотезы на рис. 15 определены предполагаемые границы погребенного палеоползневого тела у подножия крупного оползневого цирка на склоне Кукуйской Гривы.

Осадконакопление на северо-западном фланге Кукуйской Гривы, как следует из анализа данных батиметрической съемки и сейсмоакустического профилирования, во многом определялось гравитационным перемещением материала по склону. Оползневые деформации приповерхностных осадков и обнаруженные погребенные тела оползней свидетельствуют о нескольких эпизодах активизации склоновых процессов, разделенных во времени.

Слоистые отложения нормального залегания в основании сейсмического разреза, относи-

Рис. 15. Положение погребенного крупного оползневое тела у подножия склона в районе оползневое цирка, установленное по косвенным признакам: 1 — участки профилей, на которых выделены приповерхностные газонасыщенные осадки; 2 — предположительные границы погребенного оползневое тела у подножия склона; 3 — сейсмические профили (2005 г., источник «спаркер»); 4 — сейсмические профили экспедиции Class@Baikal (2014 г., источник «спаркер»); 5 — профиль профилографа и гидролокатора бокового обзора (осень 2014 г.); 6 — профили профилографа экспедиции Class@Baikal (2015 г.). Изолинии рельефа дна проведены через 50 м



мые к нижнему комплексу, локально затронуты оползанием. Формирование тел палеооползней, выделяемых на сейсмопрофилях, фиксирует, вероятно, ранний этап такой активизации. За ним следовал период спокойного осадконакопления на всей площади изученного района. Признаки склоновых гравитационных процессов в пределах верхней части нижнего комплекса не обнаружены. Отложения представлены моноклинально залегающими слоями с углами падения $\sim 7^\circ$ на северо-запад, в сторону глубоководной котловины озера. Накопление осадков, относимых к верхнему комплексу, напротив, по-видимому, весьма регулярно сопровождалось оползанием разного масштаба. Накопления, сформированные в этот период активизации склоновых процессов в районе, весьма разнообразны, что и отражается на данных сейсмоакустических исследований.

Современное оползание наиболее активно в верхней части склона. Здесь отмечены стенки отрыва и многочисленные небольшие тела оползней. Нижняя часть склона гривы существенно меньше затронута современными оползновыми процессами, что отражается в ненарушенной структуре придонных отложений на большей части площади исследований. К современному этапу также относится самое крупное из фиксируемых в изученном районе оползневое событие. Масштабное оползание в северной части Кукуйской Гривы затронуло не только отложения верхнего осадочного комплекса, но и нижележащие слои. В результате на склоне гривы образовался крупный цирк. Перемещенный этим событием материал не обнаружен на сейсмопрофилях, выполненных в районе исследований. Тем не менее строго вниз по склону от образовавшегося цирка, у подножия Кукуйской Гривы, на данных, полученных

с помощью батиметрической съемки, отчетливо выражена веерообразная в плане и небольшая по амплитуде возвышенность. Наиболее вероятно, что она представляет собой аккумулятивное тело, происхождение которого связано с оползнем, сформировавшим цирк на склоне гривы. Кроме того, результаты исследований профилографом подножия склона гривы позволяют говорить о косвенных признаках крупного погребенного оползневое тела в этой части района исследований.

Различия в характере и интенсивности гравитационных процессов в позднечетвертичное время, а также их периодичность в районе Кукуйской Гривы связаны с особенностями седиментации и типом поставляемого материала в авандельту Селенги и отражают периоды тектонической активизации в районе. В позднем плейстоцене (150 тыс. лет назад—ныне) происходили крупные поднятия плечей Байкальского рифта и одновременно с этим значительные опускания дна Байкальской впадины [Мац и др., 2001]. Перестройка потребовала выработки нового профиля эрозии в долинах рек, впадающих в озеро, и на их продолжениях на склонах Байкала. Это также отразилось в количестве и типе терригенного материала, поступающего в озеро с речным стоком. В целом усиление процессов подводной эрозии на одних участках авандельты должно было сопровождаться интенсивным накоплением новых осадочных наносов на других участках. Такой ландшафтный контраст наиболее благоприятен для активизации подводных гравитационных процессов, особенно на фоне продолжающихся неотектонических подвижек.

В 70 км на юго-запад от Кукуйской Гривы в районе Посольской банки — подводного поднятия на авандельте Селенги — проведены сейс-

моакустические работы методом непрерывного сейсмического профилирования [Colman et al., 1996]. На сейсмических разрезах строение Посольской банки аналогично строению Кукуйской Гривы, а на глубине около 30 м под дном также наблюдается отчетливая прямолинейная ось синфазности, параллельная склону возвышенности. Согласно результатам исследования керна глубоководного бурения на склоне Посольской банки возраст границы — 150 тыс. лет, что соответствует середине тазовского оледенения [Высокоразрешающая..., 2004]. Возвышенности Кукуйской Гривы и Посольской банки формировались как участки авандельты р. Селенги, впоследствии обособленные от основного комплекса авандельты различными эрозионными формами [Хлыстов и др., 2016]. Единая история аккумуляции и схожее строение верхней части осадочного разреза на обоих участках позволяют уверенно коррелировать вышеописанную границу на Посольской банке и границу, разделяющую два главных комплекса отложений, выделяемых на Кукуйской Гриве, согласно этому возраст последней также оценивается в 150 тыс. лет.

Таким образом, формирование осадочного комплекса «Б» можно отнести к среднему плейстоцену. Комплекс «А» накапливался в позднем плейстоцене и голоцене.

Заключение. Сейсмоакустические исследования северо-западного склона Кукуйской Гривы показали, что развитые здесь гравитационные процессы разнообразны по времени и характеру проявлений. Анализ данных сейсмоакустического профилирования позволил впервые выделить в строении верхней части осадочного чехла два основных сейсмокомплекса и охарактеризовать сейсмофации, слагающие их.

Нижний, более древний сейсмокомплекс «Б» характеризуется практически недеформированными отложениями (сейсмофация Б-1) с локальными зонами деструкций (сейсмофация Б-2), отвечающими древним погребенным оползневым телам. Верхний сейсмокомплекс «А» характеризуется различными типами волновой картины. В его строении выделяются три сейсмофации. Широко распространенная

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Байкала / Гл. редактор Г.И. Галазий. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России. М., 1993. 160 с.

Высокоразрешающая осадочная запись по керну глубоководного бурения на Посольской банке в озере Байкал (BDP-99) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 2. С. 163–193.

Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: Строение и геологическая история. Новосибирск: ГЕО, 2001. 252 с.

Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках Байкала (по результатам исследования 600-метрового керна глубокого бурения) // Геология и геофизика. 2000. Т. 4, № 1. С. 3–32.

в нижней и средней частях склона сейсмофация А-1 представляет практически недеформированные отложения. В верхней части склона вдоль стенки отрыва выделена сейсмофация А-2, характеризующаяся хаотической волновой картиной. Выделяемая на некоторых участках сейсмофация А-3 характеризуется увеличенной мощностью и слабонарушенной параллельнослоистой волновой картиной. Слагающие ее отложения представляют собой крупные оползневые тела, часто перемещенные на значительное расстояние без существенного нарушения внутреннего строения.

Обнаружение современных и древних проявлений оползневых процессов свидетельствует о нескольких эпизодах активизации склоновых процессов, разделенных во времени. Корреляция сейсмических профилей на Кукуйской Гриве и Посольской банке — аналогичной возвышенности на авандельте р. Селенги — позволила датировать границу между выделенными сейсмокомплексами в 150 тыс. лет назад.

Фациальные схемы, впервые составленные для этого района, позволяют оценить различия в характере и интенсивности гравитационных процессов на протяжении плейстоцен-голоценового времени.

Благодарности. Проект Class@Baikal и его научно-образовательные экспедиции под девизом «Обучение-через-исследования» немислимы без помощи и поддержки большого числа бескорыстных людей и организаций. Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам Учебно-научного Центра ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых и кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также декану факультета, академику Д.Ю. Пушаровскому.

Авторы признательны дирекции Всероссийского фестиваля науки и персонально Л.В. Гусеву за постоянную поддержку, оказываемую проекту Class@Baikal, капитанам М.В. Черных и Р.А. Битюцкому и всей команде НИС «Г.Ю. Верещагин» за их высокий профессионализм и радушную атмосферу во время экспедиций.

Соловьева М.А., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю. и др. Методика проведения и предварительные результаты сейсмоакустических работ на озере Байкал (экспедиция TTR-Class@Baikal-2014) // Электр. сб. тез. III Междунар. молодежной науч.-практич. конф. «Морские исследования и образование», 2014. С. 108–110. URL: <http://www.maresedu.com/materials> (дата обращения: 27.02.2016).

Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Хабуев А.В. и др. Геолого-геоморфологические особенности Посольской банки и Кукуйской Гривы озера Байкал // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 12. С. 2229–2239.

Casier R., Naudts L., Cuylaerts M. et al. Reassessment of gas hydrate occurrences in Lake Baikal based on the analysis of BSRs on 180 seismic reflection profiles and on the iden-

tification of submarine landslides // Book of abstracts of the 10th Intern. Conf. on Gas in Marine Sediments. Иркутск: Аспирант, 2010. P. 95–96.

Colman S.M., Foster D.S., Hatton J. High-Resolution seismic-reflection surveys of Lake Baikal, Siberia 1990–1992. 1996. USGS Open-file Rep. Vol. 96–274. P. 1–21.

De Batist M., Canals M., Sherstyankin P., Alekseev S. A new bathymetric map of Lake Baikal. URL: <http://www.lin.irk.ru/intas> (дата обращения: 10.01.2016).

Khlystov O.M., Nishio S., Hitoshi H. et al. Results of gas hydrate search on Lake Baikal in 2005–2007 and further

prospects // Abst. Intern. Conf. on Gas Hydrate Studies. 2007. P. 33.

Ramesh S., Rao D.V., Rao B.R. et al. Gas hydrate exploration and sampling in Kukuya canyon, north of Selenga delta, Lake Baikal, Russia // Earth Res. and Environ., Res. Publ. Singapore, 2013. P. 132–140.

Scholz C.A., Hutchinson D.R. Stratigraphic and structural evolution of the Selenga Delta Accommodation Zone, Lake Baikal Rift, Siberia // Int. J. Earth Sci. 2000. Vol. 89. P. 212–228.

Поступила в редакцию
03.03.2016